

SiC_p/Al 复合材料与 2024 铝合金搅拌摩擦焊搭接接头的组织与性能^{*}

宋学成, 封小松, 崔凡, 郭立杰

(上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

[摘要] 采用搅拌摩擦焊对 SiC_p/Al 复合材料和铝合金异种材料的搭接进行了研究, 并用光学显微镜和电子万能试验机对焊缝组织及力学性能进行了分析测试。结果表明: 在合适的工艺参数下, 可以获得较好的焊缝成形和无缺陷的焊缝组织。焊核区形成了明显的洋葱环形貌, 洋葱环下方是搭接区, 其中 SiC 颗粒细小, 分布均匀, 由搭接区下部到上部 SiC 颗粒呈梯度过渡。随焊接速度增加, 搭接区 SiC 颗粒尺寸有所增加, 在焊接速度为 80mm/min 时有裂纹形成, 而焊缝力学性能也有所下降。在焊接速度为 10mm/min 时, 焊缝抗剪强度较高, 达到 81.8MPa。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝合金 SiC_p/Al 复合材料; 组织; 力学性能

Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar FSWed Joint of SiC_p/Al Composites to 2024 Aluminum Alloy

SONG Xuecheng, FENG Xiaosong, CUI Fan, GUO Lijie

(Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer, Shanghai 200245, China)

[ABSTRACT] Dissimilar FSWed lap joint of SiC_p/Al composite to 2024 aluminum alloy is produced, the microstructure and mechanical properties of the joint is observed and examined, respectively. Results show that, the defect-free weld with good crown appearance can be achieved under suitable welding parameters. In WNZ, formation of onion rings can be seen clearly, under which is the lap zone with SiC particles in small sizes and homogeneous distribution. From the lower to the upper side of lap zone, the gradient microstructure is present. With the increase of the welding speed, the size of SiC particles in lap zone increases a little, and crack can be observed in 80mm/min. The shear tensile strength of the joint decreases with the welding speed increasing, and a joint strength of 81.8MPa can be achieved under the welding speed 10mm/min.

Keywords: Friction stir welding; Aluminum alloy; SiC_p/Al composites; Microstructure; Mechanical property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.139

SiC 颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al 复合材料)具有优异的物理性能和力学性能而广泛应用于航空航天、汽车制造和电子封装等领域^[1]。铝合金密度低、塑性好而且焊接性良好,在航空航天等领域有广泛应用^[2]。将两种材料进行连接,不仅能够降低单独采用 SiC_p/Al 复合材料的成本,而且能够利用铝合金良好的焊接性,获得强度较高的接头。

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种全新的固相连接方法^[3],具有焊接过程简单、焊缝质量高和焊接残余应力

及变形小等优点,避免了因材料熔化带来的焊缝缺陷,是一种较为理想的 SiC_p/Al 复合材料连接方法^[4]。国外的学者对 SiC_p/Al 复合材料与铝合金的 FSW 进行了研究,发现相比于复合材料母材,焊缝中的 SiC 颗粒更加细小且分布更加均匀,铝合金因动态再结晶而产生明显细化^[5];对接头的强度可以达到铝合金母材的 90% 左右^[6];而搭接接头性能方面的报道还尚未见到。

本文对体积百分数为 55% 的 SiC_p/Al 复合材料与 2024 铝合金的异种材料 FSW 进行了研究,分析了焊缝的组织特征和力学性能。这对于拓展异种材料 FSW 的研究范围和高比分 SiC_p/Al 复合材料的应用具有积极的作用。

^{*} 国防基础科研项目(A0320110014)、上海市优秀技术带头人项目(13XD1421300)资助。

1 试验材料及方法

采用 3mm 厚 2024-T4 铝合金与 2mm 厚体积百分数为 55% 的 SiC_p/Al6061 复合材料进行搭接试验,复合材料置于下方。搅拌工具采用 H13 热作模具钢制作。2024 与 6061 铝合金的成分见表 1。

表1 2024和6061铝合金的质量分数 %

材料	Si	Fe	Cu	Mn
AA2024	0.5	0.5	3.8~4.9	0.30~0.9
AA6061	0.40~0.68	0.7	0.15~0.40	0.15
材料	Mg	Cr	Zn	Ti
AA2024	1.2~1.8	0.10	0.25	0.15
AA6061	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15

试验中保持旋转速度为 60mm/min,改变焊接速度进行搭接。焊后沿垂直焊缝方向截取试样,打磨抛光后用混合酸溶液(5mlHNO₃,3mlHCl,2mlHF,250mlH₂O)进行腐蚀,在 Observer10 型光学显微镜下对焊缝组织进行观察,采用 EDS 对焊缝成分进行分析,并用 CMT5305 型电子万能试验机测试焊缝抗剪强度。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝表面成形及宏观形貌

图 1 为焊缝表面形貌。可以看出,焊缝表面成形较好,但前半段有毛刺产生。这是因为,搭接焊接中,搭接面热输入低于焊缝表面。为了获得较高的搭接面热输入,在焊接开始时,采用了较长的预热时间,使焊缝表面材料发生过热,并与轴肩发生粘连,产生毛刺。因此,合理控制预热时间及工艺参数,对获得表面成形良好、焊接质量较高的搭接焊缝十分重要。

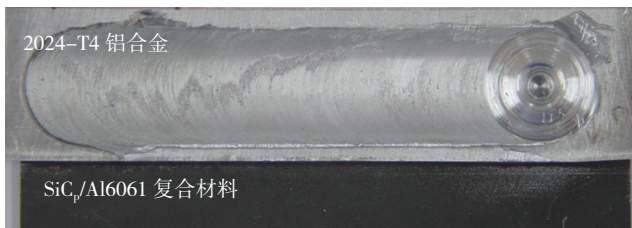


图1 焊缝表面形貌
Fig.1 Crown appearance of the joint

图 2 为焊缝横截面宏观形貌。可以看出,在所用工艺参数下,得到了内部无气孔、隧道等缺陷的焊缝。焊缝中,可以较明显地分辨出焊核区(Welding Nugget Zone, WNZ),热力影响区(Thermal Mechanical Affected

Zone, TMAZ)和热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)。同时可以看到,焊核区形成明显的洋葱环形貌,说明焊缝材料在焊接过程中受到了搅拌工具的强烈热、力作用,使焊缝材料呈现涡旋状流动特征,形成洋葱环。在洋葱环下部,可以看到受到搅拌针作用的复合材料母材,其颜色不同于复合材料母材,说明该区域组织不同于复合材料组织,本文称为搭接区。由于搭接区连接着上部的铝合金焊缝和下部的复合材料母材,对于焊缝的力学性能有重要的影响,因此,对其组织进行了详细的介绍。

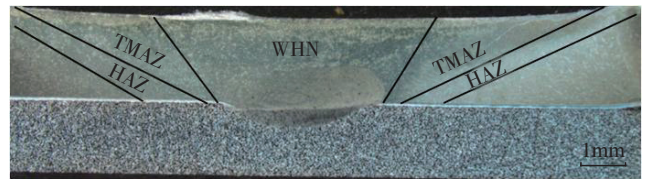


图2 焊缝横截面宏观形貌
Fig.2 Macrostructure of the joint

2.2 搭接区的组织形貌

图 3 为搭接区的宏观形貌。可以看出,搭接区上部较平,而下部则较圆滑,这对于结构的载荷传递可能有利,同时可以缓解一种材料连接过程的热错配应力,有助于提高接头力学性能。观察焊核区的 SiC 颗粒可以发现, SiC 颗粒分布均匀,尺寸相比复合材料母材中的 SiC 颗粒更加细化,说明 SiC 颗粒在搅拌针的机械搅拌作用下发生断裂、钝化和重新分布。细小的 SiC 颗粒对位错的运动有更好的阻碍作用,同时有利于基体载荷的传递,因此有利于接头强度的提高^[7]。

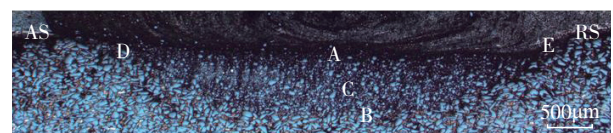
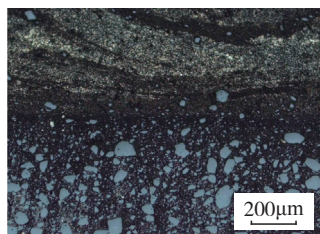


图3 搭接区宏观形貌
Fig.3 Macrostructure of lap zone

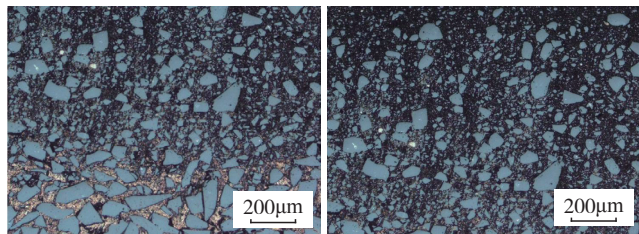
图 4 为搭接区的微观形貌。由图 4 (a)可以看出,由搭接区上部向铝合金焊缝方向, SiC 颗粒呈梯度分布形式,越靠近铝合金焊缝, SiC 颗粒越细小,数量越少。说明复合材料母材在搅拌作用下与铝合金发生混合,靠近铝合金焊缝的位置由于温度高、所受机械作用更强而更加细化;同时, SiC 颗粒在焊缝厚度方向上发生一定程度迁移,形成梯度过渡形貌。由图 4 (b)、4 (c)可以看出,搭接区中心和下部颗粒较复合材料母材更细小,但比搭接区上部 SiC 颗粒大,说明搭接区中心和下部所受热力作用小于上部所受热力作用, SiC 颗粒细化程度小。由此可见,由搭接区下部到上部, SiC 颗粒尺寸逐

渐减小,形成了颗粒尺寸的均匀过渡。这对于焊缝的应力传递有良好作用。由图4(d)、4(e)可以看出,在搭接区前进侧和后退侧,可分辨的SiC颗粒较少,说明这两个位置复合材料与铝合金发生了较强烈的混合,并有大量铝合金进入该位置。

同时,由前进侧上方的流线状组织可知,该位置材料迁移强烈,有少量复合材料进入铝合金焊缝。在后退侧,这种流线状形貌不明显,却可看到白色带状组织。根据文献可知^[8],该组织为纯铝。这说明搭接区后退侧所受搅拌针机械作用程度较弱,不能很好地将纯铝打碎、分散在焊缝中。

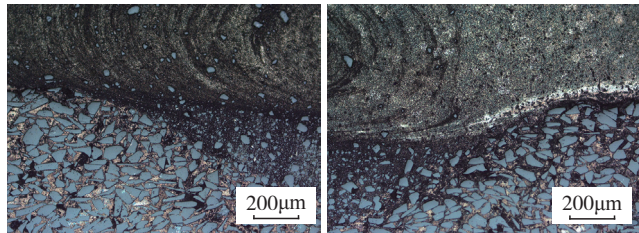


(a) 上部



(b) 下部

(c) 中心位置



(d) 前进侧

(e) 后退侧

图4 搭接区的微观形貌

Fig.4 Microstructure of lap zone

通过上述分析可以看出,搭接区由于受到搅拌针的热、力作用而呈现出与复合材料母材差异较大的组织,其中,由搭接区下部到上部,形成了SiC颗粒尺寸和含量的梯度过渡,在前进侧和后退侧则有大量铝合金混入。

2.3 焊接速度对焊缝形貌的影响

图5为不同焊接速度时搭接区的宏观形貌。可以看出,焊接速度为10mm/min和40mm/min时,搭接区无宏观缺陷。但10mm/min时,焊缝中的洋葱环更加明显,说明此时焊缝材料受到的热、力作用更强,所以迁移范

围更广所致。在焊接速度为80mm/min时,搭接区下方的前进侧出现裂纹,裂纹沿厚度方向向复合材料母材扩展,说明此时复合材料表现出更大的脆性。这是因为,随焊接速度的增加,焊接线能量的减小,搅拌针对焊缝热输入降低,使焊缝材料温度较低、塑性较小。与此同时,随焊接速度的增加,搅拌针对焊缝材料的冲击力更强,而复合材料的脆性很大,在受冲击作用下易于产生裂纹。

因此,在焊接速度为80mm/min时,搭接区前进侧产生裂纹。图6为不同焊接速度时搭接区前进侧的微观形貌。可以看出,随焊接速度改变,搭接区前进侧形貌有所改变。在焊接速度为10mm/min时,搭接区前进侧SiC颗粒细小,分布较均匀,与搭接区相邻的铝合金和复合材料母材均未产生缺陷。在焊接速度为40mm/min时,搭接区前进侧SiC颗粒尺寸增加,同时进入铝合金焊缝的SiC颗粒数量增加。

这说明,随焊接速度增加,搅拌针在搭接面处对复合材料向焊接方向的推挤作用增加,使复合材料向上翘起而进入铝合金焊缝中。在焊接速度为80mm/min时,搭接区SiC颗粒也较大,并有更多的SiC颗粒进入铝合金焊缝中,同时在搭接区与复合材料母材相邻处产生裂纹。说明此时搅拌针对复合材料的推挤作用更强,使SiC颗粒更易于进入铝合金焊缝;同时,由于焊接线能量减小,复合材料母材塑性降低,使复合材料在受到搅拌针搅拌作用和推挤作用的共同作用时发生断裂、产生裂纹。

由此可知,焊接速度对搭接区前进侧的SiC颗粒尺寸、分布及缺陷情况都有一定影响。当焊接速度较小时,SiC颗粒受机械作用时间相对较长,因而更细小。同时,焊接线能量较高,材料塑性较好,不易产生裂纹。



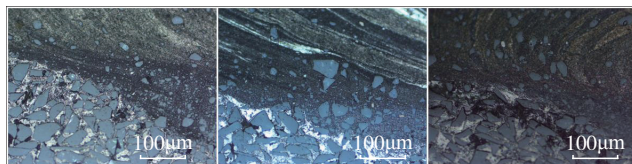
(a) 10mm/min

(b) 40mm/min

(c) 80mm/min

图5 不同焊接速度时的搭接区宏观形貌

Fig.5 Macrostructure of lap zone in different welding speed



(a) 10mm/min

(b) 40mm/min

(c) 80mm/min

图6 不同焊接速度时搭接区的微观形貌

Fig.6 Microstructure of lap zone in different welding speed

随焊接速度增加, SiC 颗粒受到的机械作用减弱, 单位长度焊接热输入也降低, 使 SiC 颗粒尺寸增加, 且在搭接区与复合材料母材相邻处易产生裂纹。

2.4 焊接速度对焊缝强度的影响

图 7 为焊接速度与接头抗剪强度的关系。可以看出, 随焊接速度增加, 接头抗剪强度有所降低。在焊接速度为 10mm/min 时, 接头强度较高, 为 81.8MPa。这说明, 焊接速度对焊缝抗剪强度有一定影响, 并存在一个较佳的焊接速度区间, 在 10mm/min 左右。结合图 5, 图 6 可对该现象进行如下解释。当焊接速度为 10mm/min 时, 焊缝未产生缺陷, 同时 SiC 颗粒细小、分布均匀, 铝合金焊缝中几乎没有大尺寸 SiC 颗粒, 搭接区起到了良好的过渡作用, 使焊缝强度较高。当焊接速度为 40mm/min 时, 焊缝中也没有缺陷产生, 但 SiC 颗粒较大, 不利于载荷的传递; 同时, 由大尺寸 SiC 颗粒进入铝合金焊缝, 使搭接区的梯度过渡作用减弱, 焊缝强度有一定程度降低。当焊接速度为 80mm/min 时, 焊缝中产生裂纹, 同时有过多的 SiC 颗粒进入铝合金焊缝中, 使焊缝强度降低程度更大, 因而出现图 7 中的接头强度规律。

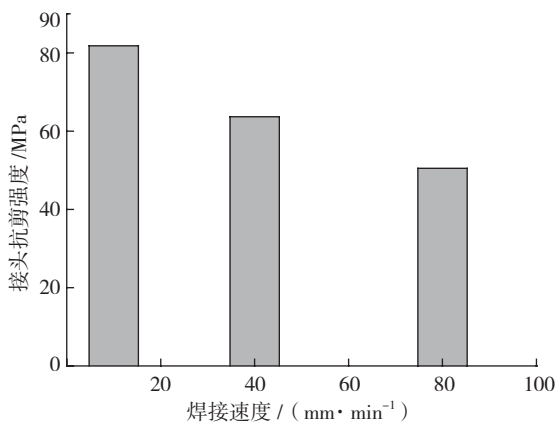


图7 焊接速度与接头抗剪强度的关系

Fig.7 Relation-curve of the welding speed and the joint strength

3 结论

(1) 采用 FSW 对 SiCp/Al6061 复合材料和 2024 铝合金进行搭接, 在适当的工艺参数下, 可以获得表面成形良好、内部没有缺陷的焊缝;

(2) 搭接区 SiC 颗粒细小, 分布均匀, 由搭接区下部到上部, 形成了 SiC 颗粒尺寸和含量的梯度过渡, 在前进侧和后退侧则有大量铝合金混入;

(3) 随焊接速度增加, 搭接区上方 SiC 颗粒尺寸有所增加, 在搭接区与复合材料母材相邻处有裂纹产生, 是焊接线能量降低、材料塑性变差及搅拌针推挤作用增强的结果;

(4) 随焊接速度增加, 焊缝强度有所降低, 在焊接速度为 10mm/min 时, 获得了较高的焊缝强度, 为 81.8MPa。

参考文献

[1] MIRACLE D B. Metal matrix composites—from science to technological significance[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(15):2526–2540.

[2] 王廷, 刘会杰, 冯吉才. 铝合金搅拌摩擦焊研究现状 [J]. 航空制造技术, 2009(20):62–65.

WANG Ting, LIU Huijie, FENG Jicai. Research status about friction stir welding of aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(20):62–65.

[3] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir butt welding: International patent application number PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8[P].1991–12–06.

[4] STORJOHANN D, BARABASH O M, BABU S S, et al. Fusion and friction stir welding of aluminum metal matrix composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, 36(11):3237–3247.

[5] XIAO B L, WANG D, BI J, et al. Friction stir welding of SiCp/Al composite and 2024 Al alloy[J]. Materials Science Forum, 2010, 638–642: 1500–1505.

[6] CESHINI L, MORRI A, ROTUNDO F, et al. A study on similar and dissimilar linear friction welds of 2024 Al alloy and 2124Al/SiCp composite[J]. Advanced Materials Research, 2010, 89:461–466.

[7] FENG A H, XIAO B L, MA Z Y. Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite[J]. Composite Science and Technology, 2008, 68:2141–2148.

[8] 张磊. 薄壁铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能 [J]. 航空制造技术, 2011(4):88–91.

ZHANG Lei. Microstructure and mechanical property for joint of friction stir welded thin aluminum alloy sheet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(4): 88–91.

(责编 宁宁)

(上接第 138 页)

Beijing Institute of Technology University Press, 2007.

[8] 陈立德. 工装设计 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.

CHEN Lide. Tooling design[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999.

[9] 王强, 万世明, 唐实. 飞机工装数字化设计制造技术的研究与应用 [J]. 航空与航天, 2008(3):1–8.

WANG Qiang, WANG Shiming, TANG Shi. Research and application of digital design and manufacturing technology for aircraft tooling[J]. Aviation and Space, 2008(3):1–8.

[10] 魏法杰, 周艳, 邢军. 航空企业工装管理分层计划方法研究 [J]. 航空学报, 2001(1):78–82.

WEI Fajie, ZHOU Yan, XING Jun. Research in multi-level planning of tooling management in airplane manufacture firms[J]. Journal of Aviation, 2001(1):78–82.

(责编 宁宁)